

Rozpoznávání dopravních značek v obrazech

Recognising the traffic signs in images

Souhlasím se zveřejněním této diplomové práce dle požadavků čl. 26, odst. 9 *Studijního a zkušebního řádu pro studium v magisterských programech VŠB-TU Ostrava*.

V Ostravě 7. května 2010

.....

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 7. května 2010

.....

Děkuji všem, kteří se na této práci podíleli, protože bez nich by nikdy nevznikla. Zvláště pak svému vedoucímu doc. Dr. Ing. Eduardu Sojkovi.

Abstrakt

Práce se zabývá analýzou statického obrazu v dopravních systémech, hlavně pak detekcí dopravního značení. Zaměřena je na různé metody detekce, s využitím mnoha postupů analýzy obrazu.

Součástí práce je implementace algoritmu detekce trojúhelníkového dopravního značení.

Klíčová slova: Analýza obrazu, dopravní systémy, detekce

Abstract

Thesis is concerned with analysis of static image in traffic systems, mainly with detection of road signs. It is specialized on various methods of detection, with usage of many methods of analysis of an image.

The part of thesis is implementation of algorithm of detection of triangular road signs.

Keywords: Analysis of an image, traffic systems, detection

Seznam použitých zkratek a symbolů

ADS	– Asistenční dopravní systémy
NS	– Neuronová síť (Neural network)
GPU	– Grafický procesor (Graphical processing unit)
OpenCV	– Otevřené kódy počítačového vnímání obrazu (Open Source Computer Vision)
RGB	– Barevný model reprezentující barvu složkami červené, zelené a modré barvy (red, green, blue)
HSI	– Barevný model reprezentující barvu složkami odstínu sytosti a jasu (hue, saturation, intensity)

Obsah

1	Úvod	4
2	Rozpoznávání dopravního značení	5
2.1	Dopravní značení	5
3	Obecný popis problému	9
3.1	Detekce - nalezení dopravního značení	9
3.2	Klasifikace	10
4	State of the art	11
4.1	Rozpoznání dopravního značení pomocí kombinace neuronových sítí a rozhodovacích modulů	11
4.2	Real-Time detekce trojúhelníkového a obdélníkového dopravního značení	14
4.3	Detekce značení shodou vzoru v měřítku logaritmických souřadnic	16
4.4	Real-Time systém pro detekci dopravního značení invariantní k posunu, rotaci a změně měřítka	18
5	Vlastní algoritmus	20
5.1	Popis činnosti algoritmu	20
6	Experiment	27
6.1	Úspěšnost lokalizace	27
6.2	Úspěšnost klasifikace	27
6.3	Doba běhu algoritmu	28
6.4	Průběh detekce	30
7	Závěr	38
8	Použité zdroje a seznam příloh	39
8.1	Literatura	39
8.2	Zdroje	39
8.3	Přílohy	39

Seznam tabulek

1	Hodnoty odstínu a sytosti pro normalizovaný HSI barevný model	14
2	Naměřené hodnoty v průběhu experimentu	28

Seznam obrázků

1	Příklad výstražného dopravního značení (zdroj www.dopravni-znacen.eu)	6
2	Příklad značky upravující přednost (zdroj www.dopravni-znacen.eu) . .	6
3	Příklad zákazové značky (zdroj www.dopravni-znacen.eu)	6
4	Příklad příkazové značky (zdroj www.dopravni-znacen.eu)	7
5	Příklad informativní směrové značky (zdroj www.dopravni-znacen.eu) .	7
6	Příklad informativní provozní značky (zdroj www.dopravni-znacen.eu) .	7
7	Příklad informativní značky (zdroj www.dopravni-znacen.eu)	8
8	Architektura rozpoznávacího systému	11
9	Vzorkování piktogramu značky	12
10	Architektura neuronové sítě	12
11	Architektura systému	14
12	Činnost klasifikátoru	15
13	Příklad úrovní Gaussovy pyramidy (zdroj www.cs.stevens.edu)	16
14	Architektura systému	18
15	Diagram činnosti algoritmu	20
16	Detekce červených oblastí	21
17	Výstup Harrisova detektoru rohů	22
18	Nalezené trojúhelníky	24
19	Shoda se vzorem	25
20	Graf doby běhu algoritmu	29
21	Rychlý průběh detekce	30
22	Pomalý průběh detekce	31
23	Průběh správné detekce	32
24	Průběh chybné detekce 1	33
25	Průběh chybné detekce 2	34
26	Průběh chybné detekce 3	35
27	Průběh chybné detekce 4	35
28	Průběh chybné detekce 5	36
29	Průběh chybné detekce 6	36

1 Úvod

Analýza obrazu je stále sledovanějším problémem v dopravních systémech. Největšího uplatnění nabývá v asistenčních řídicích systémech, kde pomáhají v řízení dopravního prostředku a zvyšují tak bezpečnost dopravy. Chvilková nepozornost řidiče často vede k závažným dopravním nehodám a právě riziko takovýchto nehod mohou asistenční řídicí systémy minimalizovat. Dokážou zabránit přehlédnutí dopravní značky, sjetí ze silnice, ale také přílišnému přiblížení se k jinému vozidlu. Existuje mnoho aplikací analýzy obrazu v dopravních systémech. Jedná se například o optické indikátory vzdálenosti využívané například k asistenci při parkování, nebo k indikování vzdálenosti od krajnice, nejčastěji se s analýzou obrazu v dopravních systémech lze setkat při řešení problému detekce dopravního značení, kterým se převážně zabývá i tato práce.

2 Rozpoznávání dopravního značení

Jak již bylo řečeno v úvodu, rozpoznávání dopravního značení je hlavním problémem analýzy obrazu v dopravních systémech. Řešení problému asistenčních dopravních systémů s ohledem na dopravní značení lze aplikovat z několika hledisek:

1. Za účelem ovlivnit jízdu. Tedy především směr a rychlost jízdy. Toto je nejčastěji realizováno smímáním vodorovného a zákazového dopravního značení, popřípadě analýzou obrazu v oblasti směru jízdy.
2. Za účelem upozornit na možné bezpečnostní rizika. Tedy upozornění na výstražné dopravní značení.
3. Řešení neovlivněné dopravním značením. Aplikováno za účelem přímo řídit vozidlo. Realizováno například pro parkování bez pomoci řidiče (Experimentálně provedeno automobilkou Volvo ve spolupráci s Linköpingskou universitou.).

2.1 Dopravní značení

Za nejdůležitější objekt zájmu ADS můžeme považovat dopravní značení. Zákon o provozu na pozemních komunikacích (č. 361/2000 Sb.) stanovuje pro území České republiky veškeré dopravní značení. Toto je děleno do několika kategorií, které rozlišují jejich účel a současně také použitelnost ADS.

Vznik dopravního značení se datuje kolem roku 120 před naším letopočtem. Byly jím patníky oddělující prostor pro pěší od prostoru pro jízdu. Prvními "značkami" byly milníky udávající vzdálenost do Říma. Postupem času se značení rozšířilo do Polska, Ruska, Německa a následně do celého světa. První značení podobné současnému se objevilo v roce 1903 v Anglii.

Na našem území (tehdejší Československo) bylo dopravní značení zavedeno až v roce 1935. Šlo o pět druhů výstražných značek. Dnes má Česká republika dvanáct skupin dopravního značení.

2.1.1 Výstražné dopravní značky

Dávající varování na možnost vzniku nebezpečné situace, upozorňující na stav a charakter úseku cesty, na objekt nacházející se ve směru jízdy a na možné zhoršené podmínky pro řízení. Jde v podstatě o skupinu nejdůležitějších dopravních značek, neboť jejich účelem je přímo varovat na rizika a minimalizovat možnost vzniku dopravní nehody. Vzhledem k jejich důležitosti řeší problém detekce tohoto značení aplikace, jenž je součástí této práce.

2.1.2 Dopravní značky upravující přednost

Určující správný postup pro bezpečné projetí dopravními uzly tak, aby nedošlo k ohrožení osob a majetku. Pro ADS mají jen nepatrný význam, respektive jejich důležitost není



Obrázek 1: Příklad výstražného dopravního značení (zdroj www.dopravni-znaci.eu)

prioritní. ADS vzhledem k velkému množství faktorů (jedoucí či nejedoucí auta, rychlost, velká variace tvarů dopravních uzlů a tedy neserializovatelná trajektorie jízdy...) nemůže samo správně ovlivnit jízdu jinak, než upozorněním řidiče na přednost.



Obrázek 2: Příklad značky upravující přednost (zdroj www.dopravni-znaci.eu)

2.1.3 Zákazové dopravní značky

Tento druh dopravního značení určuje pro úsek komunikace konkrétní pravidlo. Ať už jde o omezení rychlosti, předjíždění, specifikaci vozidla, či jiné omezení. Jako veškeré ostatní značení i účelem tohoto je zajistit plynulost dopravy. Nicméně ADS nemohou toto značení striktně dodržovat, z důvodů možnosti vzniku situace vyžadující si porušení zákazu daného značením. Jeho funkce je tedy opět omezena na varování řidiče.



Obrázek 3: Příklad zákazové značky (zdroj www.dopravni-znaci.eu)

2.1.4 Příkazové dopravní značky

Značení příkazující směr jízdy, rychlost, popřípadě jinou činnost s řízením spojenou. ADS může pomocí tohoto značení ovlivňovat řízení ve smyslu minimální rychlosti, regulace a ovládání směrových signálů a světel a samozřejmě také upozorňovat na příkazy pro systém neřešitelné, jako například volba správného příkázaného jízdního pruhu.



Obrázek 4: Příklad příkazové značky (zdroj www.dopravni-znaceni.eu)

2.1.5 Informativní směrové dopravní značky

Značky určující destinaci a směr komunikace. Z hlediska ADS nepotřebné značení. Nijak neovlivňuje bezpečnost ani plynulost dopravy, tedy vymyká se perspektivě užití asistenčních systémů.



Obrázek 5: Příklad informativní směrové značky (zdroj www.dopravni-znaceni.eu)

2.1.6 Informativní provozní dopravní značky

Upozorňující na specifika dopravní komunikace. Využitelná pro ADS jako upozorňující element. Lze ale rovněž využít i k přímému ovlivnění jízdy (například snížení rychlosti po zaznamenání značky informující o zpomalovacím prahu).



Obrázek 6: Příklad informativní provozní značky (zdroj www.dopravni-znaceni.eu)

2.1.7 Informativní dopravní značky

Informující o objektech v blízkosti komunikace. Z hlediska zajištění bezpečnosti a plynulosti dopravy pro ADS téměř nevyužitelné.

2.1.8 Dopravní značky - dodatkové tabulky

Značky upřesňující význam jiného značení. Vzhledem k variabilitě pro ADS téměř nepoužitelné.



Obrázek 7: Příklad informativní značky (zdroj www.dopravni-znaceni.eu)

2.1.9 Vodorovné dopravní značky

Toto značení je samostatná kapitola v analýze obrazu pro dopravní systémy. Pro ovlivnění směru jízdy a rychlosti nejvhodnější typ značení. Nicméně vzhledem ke kvalitě, provedení a pokrytí komunikací tímto značením je však málo využitelné. Rovněž je víc než jiné ovlivněno různými vlivy (sněžení, déšť, znečištění komunikace...).

2.1.10 Světelné signály

Signály řídící nejčastěji provoz v dopravních uzlech, vhodné k varování pro řidiče, přímé ovlivnění těmito signály není vhodné, neboť ADS nedokáže vždy určit, které ze světelných signálů určují jízdu právě řízenému vozidlu.

2.1.11 Dopravní zařízení

Většinou vodící značení, pro ADS využitelné z hlediska varování před možnou náhlou změnou směru, nebo rychlosti jízdy.

2.1.12 Zařízení pro provozní informace

Jedná se o zařízení informující o situaci na komunikaci, například varování před nehodami, obsaditelnost parkoviště, popřípadě informace o teplotě vzduchu a komunikace.

2.1.13 Speciální označení vozidel

Jedná se o označení vozidla přepravujícího osobu postiženou a nebo osobu těžce pohyblivě postiženou, vozidla řízeného osobou sluchově postiženou, vozidla řízeného řidičem začátečníkem, nebo autobusu přepravujícího děti. Pro ADS je využití tohoto značení čistě informativní.

3 Obecný popis problému

Problém rozpoznávání dopravního značení, ať už je řešen jakkoli, lze rozdělit do dvou základních částí. Těmito částmi jsou nalezení a rozpoznání značení, tedy detekce a klasifikace.

At' už je každý dílčí blok realizován jakkoli, na ADS jako celek jsou vždy kladeny dva základní nároky. Jsou jimi přesnost a rychlost. Přesnost udává procento korektně rozpoznávaného dopravního značení. Rychlost musí být dostatečná pro schopnost aplikace pracovat v reálném čase a včas podat zprávu o vyhledávaném značení.

V následujících kapitolách budou popsány principy a postupy aplikací rozpoznávajících dopravních značení.

3.1 Detekce - nalezení dopravního značení

Je prvním krokem činnosti všech rozpoznávacích aplikací. V tomto kroku jde o zjištění polohy a základních vlastností dopravního značení. Těmi jsou rozměry značení, případně základní typ (čtvercové, kruhové, trojúhelníkové...), nebo barva. Konkrétní zjišťované vlastnosti se mohou lišit v závislosti na použité metodě.

Aby bylo možno spolehlivě a efektivně detekovat pozici dopravních značek, je nezbytné provést předzpracování obrazu. Detekce značení v takto upraveném obraze může být několikrát rychlejší, nicméně při těchto úpravách dochází k jistému zkreslení obrazu, čímž může být snížena spolehlivost detekce. Předzpracování a detekci se věnují následující kapitoly.

3.1.1 Předzpracování obrazu

Předzpracování obrazu je, ač to nemusí být na první pohled zřejmé, velice důležitou částí systému pro detekci. Správným předzpracováním lze nejen předejít chybám při detekci, či zvýšit výkon celé aplikace. Předzpracování může v celém procesu hrát zcela zásadní roli, bez které se systém neobejde.

Klasickým vstupem všech systémů pro rozpoznávání značení je obraz zachycený kamerou. Tento obraz má určité elementární vlastnosti. Jsou jimi jeho rozměry a barevný model.

Různé systémy používají různé barevné modely. Jsou používány převážně modely RGB (pixely obrazu definovány hodnotami červené, zelené a modré barevné složky), HSI (Hue - odstín, Saturation - sytost, Intensity - jas) a stupně šedi. Některé systémy mohou používat i více modelů. Existují algoritmy pro převod mezi těmito modely. Bude jim věnována samostatná kapitola.

Velikost obrazu, respektive jeho rozměry, rovněž hrajou velice důležitou roli. Obraz o velkých rozměrech sice obsahuje větší množství informací o značce na něm zobrazené, ovšem s vyššími rozměry rovněž stoupá časová náročnost celého algoritmu. Proto je nutné volit kompromis mezi rychlostí a přesností.

Další vlastností obrazu, tentokrát nechtěnou, je šum. Pro jeho odstranění existuje několik algoritmů. Odstraňování šumu z obrazu bude rovněž věnována samostatná kapitola.

3.1.1.1 Barevné modely Nejčastějším výstupem kamery je soubor ve formátu JPG. Ten používá barevný model RGB. RGB je aditivní barevný model založený na obsahu tří barevných složek (červená, zelená, modrá) v hodnotách 0 až 255. Pro řadu systémů je použití tohoto modelu neefektivní, proto je z něj obraz převáděn do modelu HSI, ve kterém jsou lépe rozeznatelné barvy díky odstínové složce, nebo do obrazu ve stupních šedí, není-li informace o barvě pro daný systém podstatná vůbec.

3.1.1.2 Šum v obraze Šum je jeden z faktorů který může nepříznivě ovlivnit zpracování obrazu. Pro jeho potlačení lze použít různé metody.

Jednou z metod je takzvané průměrování, ve kterém je hodnota pixelu určena jako průměr hodnot všech okolních pixelů.

Další možností je použití Gaussova filtru. Tato metoda však vede k rozostření obrazu, čímž může ztížit jeho následnou analýzu.

Veškeré metody odstraňující šum mají za následek vyšší, či nižší míru zkreslení obrazu. Je nutné volit dobrý kompromis mezi mírou omezení šumu a zkreslení dat.

3.1.2 Detekce

V zásadě bývají používány dva náhledy na detekci značení. Prvním je detekce podle barvy (je pro značení normalizovaná), druhým je pak detekce podle tvaru. Rovněž lze také oba dva přístupy vzájemně kombinovat.

K zefektivnění detekce může být použito rovněž přihlédnutí k oblasti pravděpodobného výskytu značení. Nejčastější výskyt značení v obraze je v pravé horní čtvrtině obrazu, tedy této části může být věnována vyšší pozornost než zbývajícím.

3.2 Klasifikace

Klasifikace je nejdůležitější částí celé detekce. Existuje mnoho způsobů a přístupů ke klasifikaci.

Jedním způsobem je například porovnávání histogramů vzoru a obrazu. Tato metoda je využívána kvůli nízké složitosti porovnávání histogramů oproti porovnávání obrazů. Nese sebou ovšem řadu problémů jako například možnost totožných histogramů pro různé značky, popřípadě podobnost histogramu obrazu se značkou a obrazu bez značky.

Dalším způsobem klasifikace může být použití neuronové sítě k arbitraci. Zde je nejobtížnějším krokem zvolení správné trénovací množiny pro učení sítě.

Existuje také řada dalších metod. Některé budou popsány v následujících kapitolách.

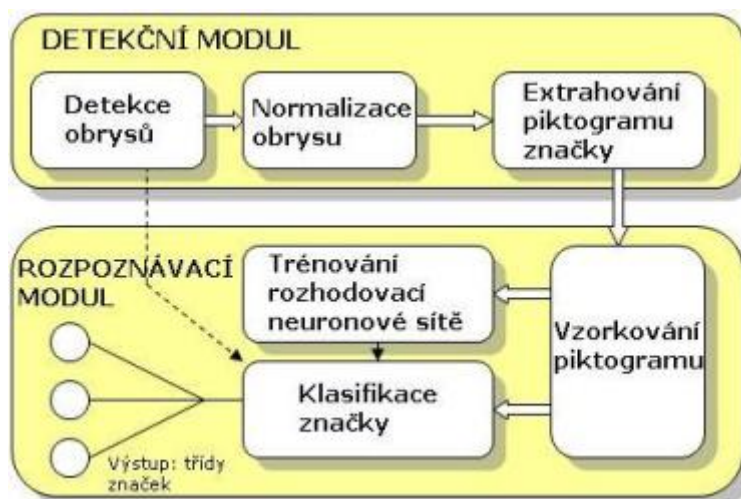
4 State of the art

4.1 Rozpoznání dopravního značení pomocí kombinace neuronových sítí a rozhodovacích modulů

(Recognition of Road Signs with Mixture of Neural Networks and Arbitration Modules)

Jedná se o metodu detekce značení popsanou Boguslawem Cyganekem v článku Recognition of Road Signs with Mixture of Neural Networks and Arbitration Modules, využívající Hammingovy neuronové sítě v arbitrážním modulu.

Obrázek 8 reprezentuje kompletní strukturu pro detekci a rozpoznání dopravního značení. Jeho funkce začíná detekcí obrysu značky. Po detekci následuje normalizace obrysu do požadované velikosti a tvaru. Normalizace je realizována afinními transformacemi, to je posunutím, rotací a změnou měřítka. Po normalizaci je piktogram v nalezeném obrysu binarizován jednoduchým prahováním. Hodnota prahu lze určit empiricky (v případě této metody byla použita hodnota 128). Posledním krokem detekčního modulu je rozvzorkování vyprahovaného obrazu a vytvoření vektoru obsahujícího binární data reprezentující piktogram. Schéma postupu zobrazuje obrázek 9. Rozhodovací, nebo taky



Obrázek 8: Architektura rozpoznávacího systému

klasifikační modul se skládá ze dvou hlavních částí. Z modulu generujícího deformované modely piktogramů, používaných jen ve fázi trénování rozpoznávání, a z hybridního klasifikátoru složeného z neuronové sítě a rozhodovacího modulu (Viz obrázek 8).

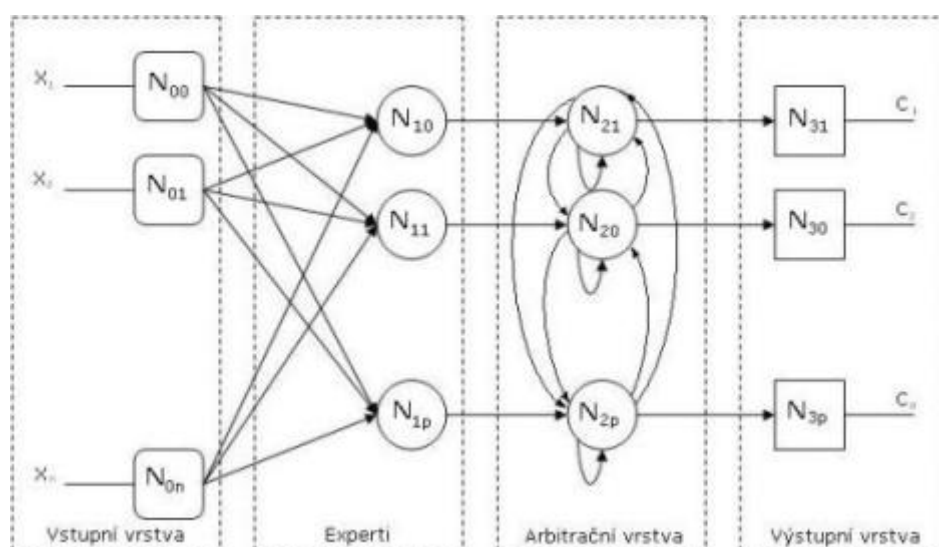
Během rozpoznávací fáze je obraz sformován na požadovanou velikost a dán na vstupy neuronovým sítím (expertům). Každý expert je zodpovědný za rozhodnutí ve skupině jednotlivých deformací (například posunutí, rotace, naklonění). Výstupy těchto expertů tvoří vstup arbitrážního modulu, jenž je součástí klasifikátoru.

Vzhledem k binárnímu vstupnímu signálu je v této metodě použita Hammingova neuronová síť, která přímo zachycuje pravidlo nejbližšího souseda. Tato síť provádí kla-



Obrázek 9: Vzorkování piktogramu značky

sifikaci binárních vektorů do tříd. Klasifikace se provádí na základě chyby, definované pomocí Hammingovy vzdálenosti vstupního vektoru od třídy. Třídy jsou definovány vzorovými vektory. Vstupní vektor je pak přiřazen třídě, od níž má nejmenší Hammingovu vzdálenost (počet neshodných bitů mezi vstupním binárním vektorem a vzorovým vektorem třídy).



Obrázek 10: Architektura neuronové sítě

Architektura této NS se skládá ze čtyř vrstev:

- vstupní vrstva
- vrstva určující Hammingovu vzdálenost (experti)
- vrstva neuronů soutěžících o rozhodnutí náležení vektorů ke své třídě (arbitrační jednotka)
- výstupní vrstva

Arbitrační jednotka, jenž je součástí klasifikátoru, nakonec na základě výstupu expertů rozhodne. Její činnost započne po skončení rozhodování všech expertů a ukončí se, až zůstane jeden vítěz. Architekturu této neuronové sítě zobrazuje obrázek 10.

4.2 Real-Time detekce trojúhelníkového a obdélníkového dopravního značení

(Real Time Detection of the Triangular and Rectangular Shape Road Signs)

Je metoda popsána ve stejnojmenném článku Boguslawy Cyganka (viz literatura).

Architektura této metody je zachycena na obrázku 11. Popis této metody se zaměřuje především na její první dvě části, tedy na filtraci obrazu a nalezení obrysu.



Obrázek 11: Architektura systému

4.2.1 Získání obrazu a filtrace

Pro tuto metodu je vhodné při pořizování obrazu použít polarizační filtr zvýrazňující určité spektrum barev (závislé na požadavcích). Následně je provedena barevná segmentace.

Ideální je pro tuto segmentaci použít HSI barevný model. V popisovaném problému byly detekovány dopravní značky na území Polska, tedy bylo segmentováno podle modré a žluté barvy. Empiricky získané hodnoty odstínu a sytosti těchto barev v normalizovaném HSI modelu [0-255] uvádí tabulka 1.

	Odstín	Sytost
Modrá	[120 - 165]	[80 - 175]
Žlutá	[15 - 43]	[98 - 255]

Tabulka 1: Hodnoty odstínu a sytosti pro normalizovaný HSI barevný model

Ze získaných dat je posléze odstraněn šum použitím morfologické eroze. Může také být použit jiný sofistikovanější přístup (například použití filtru). Následuje detekce obrysu.

4.2.2 Detekce obrysu

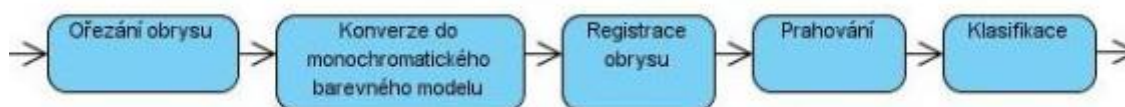
Proces detekce obrysu se skládá ze čtyř částí:

- Detekce významných bodů
- Seskupení shluků významných bodů
- Detekce tvaru
- Ověření obrysu

Detekcí významných bodů je získáno mnoho bodů, z nichž jsou pomocí seskupování shluků vyseparovány nejvýznamější body tvořící rohy detekovaných obrysů. Z těchto bodů detektor sestaví hledané obrysy (v případě dopravních značek tedy trojúhelníky a obdelníky). Následuje proces verifikace, ve kterém je ověřováno, zda nalezené obrysy odpovídají specifikaci dopravních značek.

4.2.3 Klasifikace

Předchozí kroky zpracování obrazu získaly předpokládaný tvar a pozici dopravní značky. Klasifikátor musí tuto nalezenou oblast zpracovat a určit o jakou konkrétní dopravní značku se jedná. Činnost klasifikátoru je zobrazena na obrázku 12.



Obrázek 12: Činnost klasifikátoru

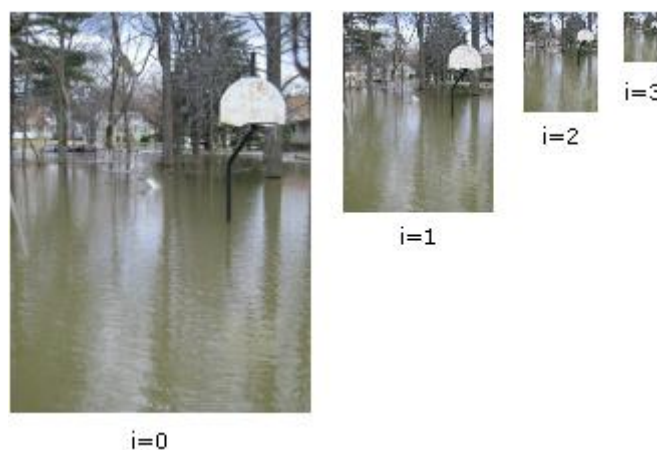
- Ořezání nalezeného obrysu - teoreticky by tento krok mohl být proveden později, z praktického hlediska se k němu však přistupuje již nyní, a to zejména pro zvýšení výkonu systému. Následné operace nebudou prováděny nad celým zachyceným obrazem a tím se zkrátí doba nutná pro výpočetní činnost.
- Získaný výřez obrazu je převeden z původního HSI barevného modelu do obrazu ve stupních šedi.
- Obrys je následně registrován a je vybrána podmnožina možných značek s nimiž se může shodovat.
- Prahováním získáme binarizovaný obraz.
- Následuje klasifikace, kdy je binarizovaný výřez získaného obrysu porovnán s binarizovanými předlohami dopravních značek.

4.3 Detekce značení shodou vzoru v měřítku logaritmických souřadnic

(Road Signs Recognition by the Scale-Space Template Matching in the Log-Polar Domain)

Tato metoda rozpoznávání dopravního značení se snaží předejít různým problémům, jako částečné zakrytí značení, různá úroveň osvětlení, nebo šum v obraze. Klíčem k vyřešení těchto problémů je zpracování obrazu v prostoru Gaussianu a vyhledávání v logaritmickém měřítku. Postup metody se skládá z následujících kroků:

- Vstupní obraz je převeden z barevného modelu na obraz ve stupních šedi.
- Ze získaného obrazu je sestavena Gaussova obrazová pyramida (Příklad úrovní Gaussovy pyramidy viz obrázek 13).



Obrázek 13: Příklad úrovní Gaussovy pyramidy (zdroj www.cs.stevens.edu)

- Následuje výběr úrovně z Gaussovy obrazové pyramidy. Pro volbu správné úrovně jsou potřebné experimentální vzorová data. Při výběru nízkého stupně bude vyhledávání časově náročnější, naopak při výběru příliš vysokého stupně pyramidy je získaný obraz velmi zmenšen a rozostřen, a k požadovanému nalezení oblasti nemusí dojít vůbec.
- Zvolená úroveň Gaussovy pyramidy je transformována do logaritmického měřítka. Stejná transformace je provedena na vzorech dopravního značení, které budou systémem rozpoznávané.

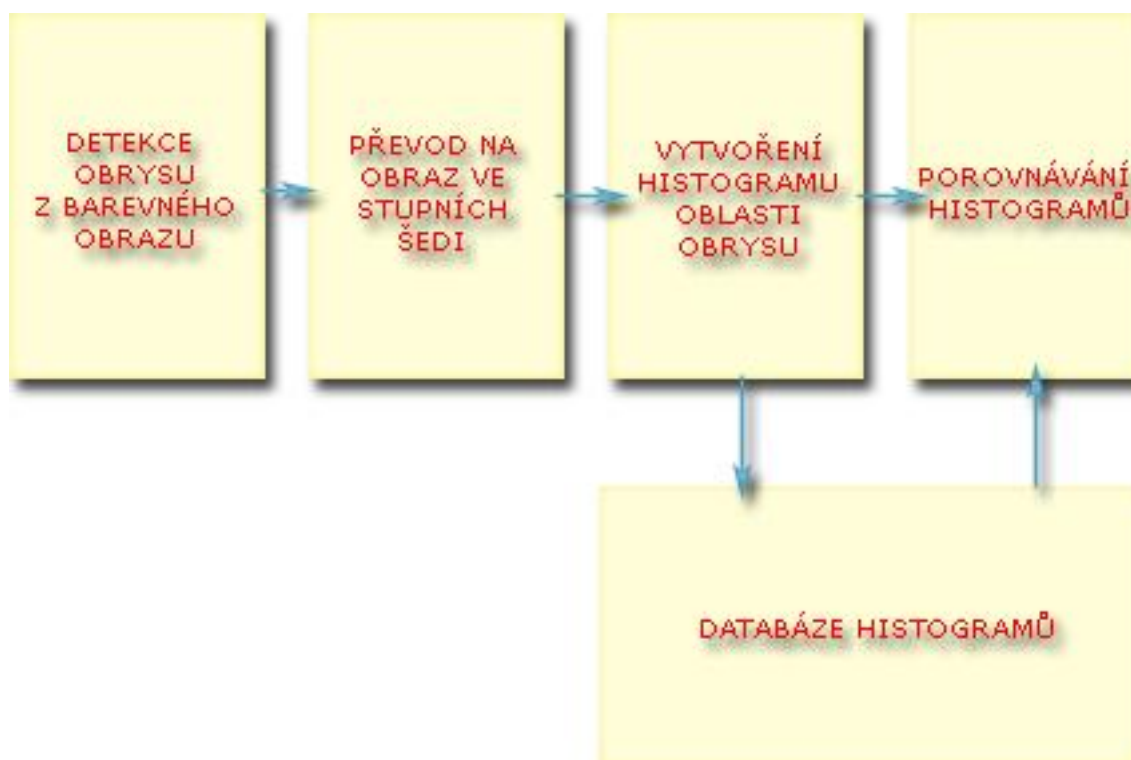
V této metodě bývají používány vyšší stupně Gaussovy pyramidy k tomu, aby byly nalezeny "slibné" oblasti obrazu. Pokud jsou vyhledávaným objektem kruhové dopravní značky, okno zájmu nabývá tvar čtverce, a střed transformace je geometrickým středem okna zájmu. Toto je dáno tím, že střed piktogramu dopravního značení udává jeho smysl, tedy mu bude věnováno nejvíce zájmu.

- posledním krokem je porovnávání získaného transformovaného obrazu s transformovanými předlohami dopravního značení. Systém obsahuje dva separátní klasifikátory, každý porovnává vlastní vzory a každý pracuje s různými úrovněmi Gaussovy pyramidy.
 - První klasifikátor porovnává vzory s obrazem z vyšší úrovně Gaussovy pyramidy. Proces komparace probíhá pro každý bod obrazu, pracuje se s oblastí o velikosti porovnávaného vzoru. Ve skutečnosti je oblast porovnávání větší než vzor. Je to dáno možnostmi rotace, posunu a jiného měřítka objektu na obrazu a předloze.
 - Druhý klasifikátor rovněž používá transformovaný obraz, ovšem k transformaci byl předložen obraz z nejnižší úrovně Gaussovy pyramidy, tedy obraz v největší kvalitě. Proces porovnávání tentokrát probíhá pouze v oblastech zájmu zjištěných prvním klasifikátorem, což vede ke snížení výpočetního času. Výsledkem porovnávání tohoto klasifikátoru je přijetí, či případné zamítnutí vzoru.

Hlavní výhodou této metody je její univerzálnost. Je možné ji použít na všechny druhy dopravního značení. Rovněž je schopna odolávat rušivým vlivům, jako je rotace značení, špatné osvětlení, šum v obraze. Nevýhodou metody je značná doba výpočtu, tedy výpočetní náročnost má za následek nepoužitelnost v real-time systémech, pokud není k dispozici GPU.

4.4 Real-Time systém pro detekci dopravního značení invariantní k posunu, rotaci a změně měřítka

(A Real-Time Vision System for Traffic Signs Recognition Invariant to Translation, Rotation and Scale) Tento systém detekce značení popsany v článku Boguslawy Cyganka, je složen ze dvou hlavních částí. Jsou jimi tradičně detekce a klasifikace. Systém detekce je v tomto případě realizován nalézáním obrysů v barevných obrazech. Systém klasifikace se sestává ze tří hlavních činností, a to převodu obrazových informací, vytvoření histogramu požadované oblasti a porovnávání těchto histogramů. Architektura je zobrazena na obrázku 14.



Obrázek 14: Architektura systému

4.4.1 Detekce obrysů

Detekce probíhá v barevném obraze. Lze zde tedy využít barevnosti dopravního značení. Obraz může být prahován dle požadované barvy. Ve výsledném obraze je odstraněn šum, poté pak provedeno zjištění gradientu každého pixelu. Následně je detektorem hran (například Cannyho detektorem) obraz gradientu zpracován do obrazu obsahujícího pouze obrysy. Nakonec jsou matematickou morfologií, konkrétně pak erozí a dilatací, odstraněny nevýznamné hrany.

4.4.2 Převod obrazu

Převedení obrazu do stupní šedi má sice za následek ztrátu informací o barvě, nicméně ta již v tuto chvíli není důležitá. K následujícím krokům je zapotřebí pouze monochromatický obraz, zpracovávání barevného by mělo za následek zvýšení nároků na systém. Převod lze uskutečnit podle následujícího vzorce:

$$Y = 0.3 \cdot R + 0.59 \cdot G + 0.11 \cdot B$$

Kde Y je výsledný jas, R je červená barevná složka, G je zelená barevná složka a B je modrá barevná složka. Zvolené konstanty nejsou striktně určené, lze je dle potřeby upravit vzhledem ke snímacímu zařízení, osvětlení a jiným ovlivňujícím faktorům.

Následuje vytvoření histogramu. Ten je tvořen samostatně pro každou oblast, ve které byl nalezen obrys.

4.4.3 Porovnávání histogramů

K porovnání histogramu je zapotřebí databáze histogramů rozpoznávaných vzorových dopravních značek. Samotné porovnávání je realizováno jako hledání minimální euklidovské vzdálenosti mezi vektory tvořenými hodnotami histogramu. Problémem této metody je jednak nespecifikovatelnost pixelů, které se vyskytují v oblasti nalezeného obrysu, ale nejsou součástí dopravní značky, ale hlavně značná podobnost (v některých případech naprostá shodnost) histogramů značek.

Řešení tohoto problému spočívá ve výpočtu histogramu pro různé části dopravní značky. Čím více částí bude samostatně porovnáváno, tím větší přesnosti u určování dosáhneme. Rovněž ale dojde vzhledem k nutnosti neustále zjišťovat euklidovskou vzdálenost k navýšení výpočetního času.

Vzhledem k omezenosti množiny dopravního značení postačuje rozdělení obrazu na dvě vertikální poloviny, popřípadě na čtyři části.

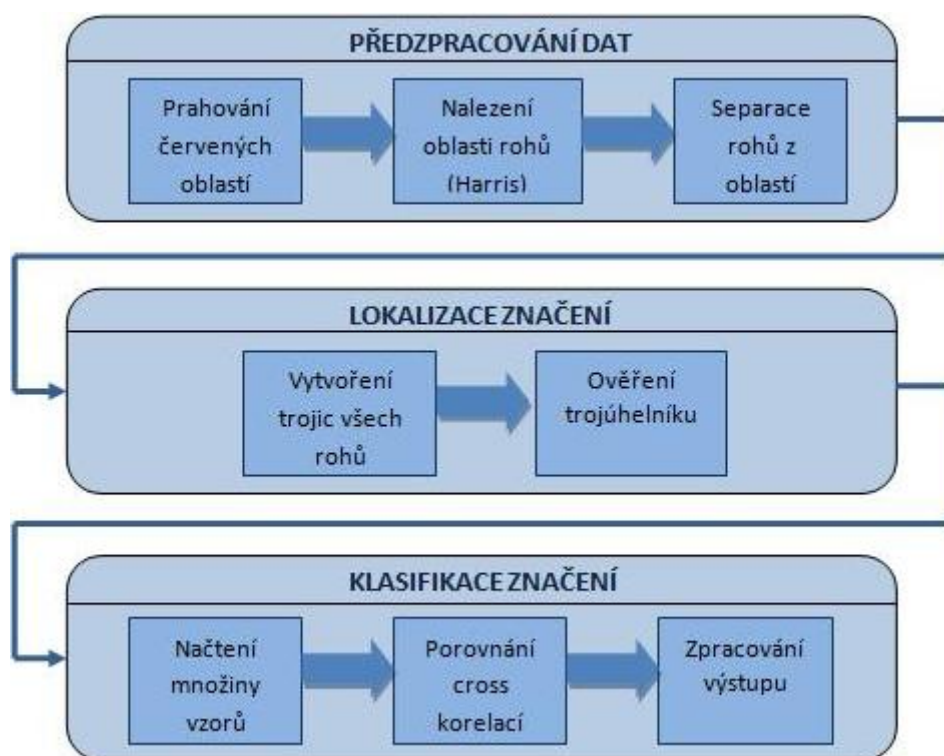
5 Vlastní algoritmus

Vlastní algoritmus rozpoznávače dopravního značení, jenž je hlavní částí této práce je implementován v programovacím jazyce C/C++ s využitím knihoven OpenCV.

Je schopen rozpoznávat veškeré trojúhelníkové značení specifikované dle Zákona o provozu na pozemních komunikacích.

5.1 Popis činnosti algoritmu

Tak jako všechny systémy pro rozpoznávání dopravních značek je i tento založen na architektuře "Najdi a rozpoznej", tedy se skládá ze tří hlavních modulů, preprocesního, připravujícího obrazová data pro další zpracování, detekčního, pro nalezení značení, a arbitračního, pro klasifikaci piktogramu. Přesnou činnost jednotlivých modulů popisují následující kapitoly.



Obrázek 15: Diagram činnosti algoritmu

Vstupem algoritmu jsou obrazová data. Tyto jsou následně zpracována a prahováním je zjištěn výskyt červené barvy v obraze. U zjištěných oblastí je Harrisovým detektorem určen výskyt významných bodů, ze kterých je určována pravděpodobná oblast výskytu značení. Všechny takto zjištěné oblasti jsou poté porovnány s kolekcí vzorů dopravních značení. Při dostatečně velké shodě oblasti se vzorem je poté určen konkrétní typ značení vyskytující se v obraze.

Podrobný popis činnosti je uveden v následujících kapitolách.
Činnost celého algoritmu názorně zobrazuje diagram činnosti (obrázek 15).

5.1.1 Preprocesní část

Ze vstupního souboru jsou načtena obrazová data do struktury *IplImage* (Třída knihovny OpenCV). Následně je obraz prahován do monochromatického výstupního obrazu stejných rozměrů jako vstup. Prahovacím kritériem je barva obrazového bodu (v tomto případě červená, vzhledem ke stejné barevnosti reliéfu veškerého trojúhelníkového značení). Tento postup umožňuje zjistit, které oblasti obrazu lze pokládat za potenciální obrysy dopravního značení.

Protože jsou data ve formátu BMP, je použitý barevný model RGB. Konkrétní kritérium je proto majoritně určeno velikostí R barevné složky obrazového bodu. Složky G a B pak nesmí přesáhnout maximální limit.

Kvalitnějšího prahování by bylo možno dosáhnout pomocí převodu barevného modelu obrazu z RGB na HSI a následným prahováním podle hodnoty H - odstínu - bodu obrazu. To by ovšem mělo za následek prodloužení doby práce algoritmu o čas nutný ke konverzi. Prahování podle barevných složek modelu RGB je navíc dostatečně efektivní.

Ve výstupním obraze jsou tedy pixely, které byly v původním obraze zastoupeny červenou barvou (případně barvou blízkou červené v závislosti na hodnotách barevných složek), reprezentovány vysokou jasovou složkou (jas 255 odpovídá bílé barvě), naopak nečervené pixely původního obrazu mají hodnotu jasu rovnou 0 (tedy černá barva). Příklad zpracování zobrazuje obrázek 16.



Obrázek 16: Detekce červených oblastí

Tímto postupem jsou za případné nositele požadovaných informací o značení označeny všechny body blízké se požadované barvě. Z toho plynou dva důsledky:

1. Jsou označeny rovněž pixely, které dopravnímu značení nenáleží, ale barvou odpovídají, či se blíží barvě značek. Tedy jsou k dalšímu zpracování poslány mylné informace. Vzhledem k principu algoritmu se tomu nelze vyhnout, jejich přítomnost však bude později odhalena a budou ignorovány.
2. Jsou označeny pixely, které se barvou pouze blíží požadovaným hodnotám. Takové pixely však mohou být také těmi hledanými a jejich hodnoty se liší z důvodu znečištění značení, špatného osvětlení, případně z jiných důvodů. Rovněž také mohou být neplatnými, pak pro ně bude platit stejný postup, jako byl uveden v předchozím bodě.

Na získaný monochromatický obraz je následně aplikován Harrisův detektor rohů.

Tento detektor je založen na výpočtu lokální autokorelační funkce, která zjišťuje lokální změny jasu mezi dvěma mírně posunutými vzory. Jeho činnost podrobně popisuje následující podkapitola.

Detail výstupu Harrisova detektoru zobrazuje obrázek 17.



Obrázek 17: Výstup Harrisova detektoru rohů

Z obrázku 16 je patrné, že bylo zvoleno pouze malé okolí zájmu od nalezených rohů. K tomuto kroku bylo přistoupeno s ohledem na snadnost detekce požadovaných rohů. Ta je dána strukturou dopravního značení. Vnitřní okraj červeného rámu vždy sousedí s bílou barvou, bod zájmu je tedy značně zřetelný. Jasová složka daného pixelu v oblasti zájmu nadto udává míru jistoty, že jde o požadovaný roh.

Následně jsou ohraničeny jednotlivé oblasti zájmu a z každé takovéto oblasti je vybrán jeden bod, který pro následný postup bude považován za roh. Postup výběru bodů je definován jako nalezení lokálního jasového maxima v ohraničené oblasti obrazu, respektive jako nalezení nejjasnějšího bodu v konkrétní oblasti zájmu.

5.1.1.1 Harrisův detektor Tento detektor využívá Harris Stephensův algoritmus, pracující na principu sledování hodnot gradientu v jednotlivých bodech snímku posunutého v různých směrech.

Principem je získání autokorelační matice pro každý pixel obrazu. Jde o Hessovu matici druhých parciálních derivací. Matice má následující tvar:

$$A = \begin{bmatrix} \langle I^2_x \rangle & \langle I_x I_y \rangle \\ \langle I_x I_y \rangle & \langle I^2_y \rangle \end{bmatrix}$$

Lomené závorky vyjadřují konvoluci s Gaussovou funkcí:

$$\langle \psi(x, y) \rangle = \psi(x, y) * [G(x)G(y)]$$

kde $*$ je konvoluce a $G(u)$ je Gaussova funkce definována následovně:

$$G(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right)$$

Z matice jsou získána vlastní čísla, určující, zda je daný bod rohový, respektive významný, či ne.

Tento fakt je určen dvěma jejími vlastnostmi:

- Vlastní čísla musí být přibližně stejně veliká
- Velikost obou musí být mnohem větší než nulová

Vlastní čísla jsou definována následovně:

$$\lambda_{1,2} = \frac{\langle I^2x \rangle + \langle I^2y \rangle \pm \sqrt{(\langle I^2x \rangle - \langle I^2y \rangle)^2 + 4 \cdot \langle I_x I_y \rangle \cdot \langle I_x I_y \rangle}}{2}$$

Významnost bodu je na základě těchto hodnot stanovena následovně:

$$M = \lambda_1 \cdot \lambda_2 - \kappa \cdot (\lambda_1 + \lambda_2)^2$$

Kde κ je nastavitelný parametr pro optimalizaci výsledku. Experimentálně byly určeny nejvhodnější hodnoty pro $\kappa = 0,04 \dots 0,15$

Tento výpočet je ale vzhledem k použité odmocnině časově příliš náročný. Proto Harris namísto něj vytvořil následující vzorec:

$$M = \text{Det}(A) - \kappa \cdot \text{Trace}^2(A)$$

Kde hodnota M určuje významnost bodu. Ze získaných hodnot pro každý pixel získáme mapu významných oblastí. Funkce Det určuje determinant matice A a Trace udává součet prvků hlavní diagonály matice.

5.1.2 Lokalizační část

V této části má algoritmus k dispozici množinu bodů (byly li nějaké detekovány), které jsou potenciálními rohy hledané trojúhelníkové dopravní značky. Nejjednodušší lokalizací by tedy mohl být postup, ve kterém zjistíme maximální a minimální souřadnice x a y z množiny všech těchto bodů. Tento postup však není optimální vzhledem k pravděpodobnému výskytu "rušivých" bodů. Proto je nutné z celé množiny vybrat pouze ty, které definují dopravní značku. Vzhledem k množině vyhledávaných značek, jenž jsou trojúhelníkové, je výběr bodů proveden na základě vlastnosti rovnoramenného trojúhelníku. Právě rovnoramenný trojúhelník tvoří tvar trojúhelníkových značek. Využitou vlastností je stejná délka hran trojúhelníku, respektive stejná vzdálenost rohů.

Všechny nalezené body jsou v tuto chvíli tedy pokládány za rohové a pro všechny trojice bodů je zjišťována jejich vzájemná vzdálenost. Zjištěné délky jsou porovnávány a odpovídají li si jednotlivé délky hran v trojúhelníku, je příslušná trojice bodů vzata v úvahu jako potenciální místo výskytu značky.



Obrázek 18: Nalezené trojúhelníky

Při samotném porovnávání je navíc pro reálnou aplikaci nutné vzít v úvahu, že snímaná dopravní značka není vždy kolmo k optické ose kamery, nebo může být deformovaná, a tedy je nutné počítat s určitou tolerancí v rovnosti délky hran značení. V aplikaci je použitá tolerance stanovena na 10%.

Tento postup může sice zapříčinit nalezení trojúhelníků tvořících obrys dopravního značení, nicméně přebytečné nalezené objekty budou později zavrženy klasifikátorem, popřípadě podobnost nesprávně nalezeného trojúhelníku vůči vzorovému značení bude daleko nižší, než u správně nalezeného.

Výstup lokalizátoru zobrazuje obrázek 18.

5.1.3 Arbitrační část

Arbitrační část algoritmu je jeho závěrečnou fází. Zpracovává nalezené oblasti s pravděpodobným výskytem dopravního značení z lokalizační části. Jejím výstupem je pak informace o nalezeném značení.

Celý průběh arbitrace lze rozdělit do tří fází.

1. Načtení všech vzorů dopravního značení jako obrazy ve stupních šedi do paměti. Zároveň jsou do paměti načítány samostatné oblasti nalezených trojúhelníků.
2. Na načtenou nalezenou oblast jsou aplikovány transformace, aby svou velikostí odpovídala vzoru.
3. Každá oblast trojúhelníku je porovnávána se všemi načtenými vzory metodou normalizované cross-korelace. Tu podrobněji popisuje následující podkapitola. Do paměti je uložena míra podobnosti se vzorem.
4. Ze získaných dat o podobnosti je následně vyselektován případ, při kterém byla zjištěna největší míra podobnosti. Vzor takto získané hodnoty, pokud je dostatečná (respektive hodnota shody je vyšší než experimentálně získaná hranice), je označen za nalezenou značku (viz obrázek 19).

Složitost Arbitrační části je v $O(n)$, kde n je počet obrazů k rozpoznání pro všechny vzory.



Obrázek 19: Shoda se vzorem

5.1.3.1 Normalizovaná Cross-Korelace Korelace mezi dvěma signály (cross-korelace) je běžný přístup k funkci detekce, jakož je i součástí sofistikovanější techniky (například rozpoznávání rysů v obličejích).

Použití cross-korelace pro porovnávání vzorů je založeno na měření vzdálenosti (konkrétně na druhé mocnině Euklidovské vzdálenosti).

$$d_{f,t}^2(u, v) = \sum_{x,y} [f(x, y) - t(x - u, y - v)]^2$$

kde f je obraz a suma přes x, y v okně obsahující předlohu t na pozici u, v . V rozšíření lze d^2 vyjádřit jako:

$$d_{f,t}^2(u, v) = \sum_{x,y} [f^2(x, y) - 2f(x, y)t(x - u, y - v) + t^2(x - u, y - v)]$$

výraz $\sum t^2(x - u, y - v)$ je konstantní. Pokud se $\sum_{x,y} f^2(x, y)$ rovněž blíží konstantní hodnotě, pak zbývající cross-korelační výraz

$$c(u, v) = \sum_{x,y} f(x, y)t(x - u, y - v)$$

je míra shody mezi obrazem a předlohou.

Existuje několik nevýhod použití výše uvedeného vztahu pro porovnávání vzorů:

- Rozsah $c(u, v)$ je závislý na velikosti předlohy.
- Pokud energie obrazu $\sum f^2(x, y)$ kolísá s pozicí, porovnávání může selhat. Například korelace mezi předlohou a přesně vyhovujícím regionem může být nižší, než korelace mezi předlohou a místem s příliš velkým jasnem.
- Porovnávání není invariantní vůči změnám v obrazové amplitudě, jako například proměnná úroveň osvětlení obrazu.

Tyto problémy řeší korelační koeficient normalizováním obrazu a vektorů na jednotkovou délku:

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}] [t(x - u, y - v) - \bar{t}]}{\left\{ \sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}_{u,v}]^2 \sum_{x,y} [t(x - u, y - v) - \bar{t}]^2 \right\}^{0,5}}$$

kde \bar{t} je střední hodnota předlohy, $\bar{f}_{u,v}$ je střední hodnota $f(x, y)$ v regionu obrazu pod předlohou.

6 Experiment

K provedení experimentu byla použita série dvaceti fotografií trojúhelníkového dopravního značení. Vzhledem k vlastnostem algoritmu, který pracuje s barevnou informací byly vybrány fotografie s denním osvětlením značení. Rozlišení fotografií bylo ve většině případů 800x600 pixelů.

V průběhu byly sledovány tyto aspekty:

- Úspěšnost lokalizace
- Úspěšnost klasifikace
- Doba běhu algoritmu

6.1 Úspěšnost lokalizace

Proces lokalizace má v algoritmu jako výstup všechny předpokládané pozice dopravního značení. Vyskytuje li se mezi těmito pozicemi oblast se značením, je lokalizace považována za úspěšnou. Celý proces trvá přibližně 0,2 sekundy, v závislosti na počtu významných bodů v oblastech červené barvy a velikosti fotografie.

Jednotlivé oblasti výskytu jsou vybírány jako rovnostranné trojúhelníky pomocí kombinace všech trojic bodů. Tento postup se může zdát neefektivní s příliš velkou složitostí, nicméně vzhledem k reálným obrazům a faktu, že se pracuje jen s významnými body červené barvy, nemá složitost algoritmu sestavení trojúhelníku významný vliv na celkovou dobu činnosti algoritmu.

Úspěšnost lokalizace velice ovlivňují barevné vlastnosti obrazu. K maximalizaci výkonu je vhodné použít filtr pro zvýraznění odstínů červené. Pokud značení nemá požadované barevné vlastnosti, je lokalizace ve většině případů provedena nesprávně. Do jisté míry tomu lze předejít změnou hodnot pro prahování červené, respektive nastavením větší tolerance pro vyhledání této barvy. To má ovšem často za následek nalezení mnoha dalších chybných oblastí a potenciální riziko příliš dlouhého běhu klasifikátoru.

Během experimentu bylo dosaženo 95% úspěšnosti lokalizace značení, především díky volbě značení s jasným denním osvětlením.

6.2 Úspěšnost klasifikace

Úspěšnost klasifikátoru závisí především na podobnosti obrazu se vzorem. Vliv může mít tedy znečištění, deformace, natočení, špatné osvětlení, velikost a mnoho dalších faktorů.

Rovněž může sehrát roli okolí značení. Vzhledem k trojúhelníkovému tvaru značení a čtvercovému vstupu klasifikátoru je jeho součástí i bezprostřední okolí značení, která je předem nepredikovatelná a tedy nelze jednoznačně určit nejvhodnější vzor pro komparaci. Tento problém lze do jisté míry vyřešit přidáním dalších vzorů s různým pozadím, popřípadě vzoru dát jakési "průměrné" pozadí. Přidáním vzorů ovšem dojde k prodloužení doby činnosti klasifikátoru.

Během experimentu bylo dosaženo 70% úspěšnosti klasifikace. Konkrétní údaje udává tabulka 2.

V případě číslo 5, 13, 17 byla chyba způsobena velkou vzdáleností značení, tedy příliš málo čitelným piktogramem.

V ostatních případech nebyla chyba způsobena nečitelností piktogramu, nicméně algoritmus cross-korelace vyhodnotil značení podobnější jinému vzoru.

	Soubor	Velikost	Lokalizace	Klasifikace	Doba běhu [s]
1.	pic01.bmp	383x278	ok	ok	0,289
2.	pic02.bmp	332x500	ok	ok	0,215
3.	pic03.bmp	980x735	ok	ok	0,997
4.	pic04.bmp	653x490	ok	ok	0,212
5.	pic05.bmp	800x600	chyba	chyba	0,524
6.	pic06.bmp	800x600	ok	ok	0,934
7.	pic07.bmp	800x600	ok	ok	0,316
8.	pic08.bmp	800x600	ok	ok	0,737
9.	pic09.bmp	800x600	ok	chyba	0,530
10.	pic10.bmp	800x600	ok	chyba	0,389
11.	pic11.bmp	800x600	ok	ok	0,471
12.	pic12.bmp	800x600	ok	ok	0,639
13.	pic13.bmp	800x600	ok	chyba	0,547
14.	pic14.bmp	800x600	ok	ok	7,661
15.	pic15.bmp	800x600	ok	ok	0,451
16.	pic16.bmp	800x600	ok	ok	3,527
17.	pic17.bmp	800x600	ok	chyba	0,635
18.	pic18.bmp	800x600	ok	chyba	0,673
19.	pic19.bmp	800x600	ok	ok	0,764
20.	pic20.bmp	800x600	ok	ok	0,202

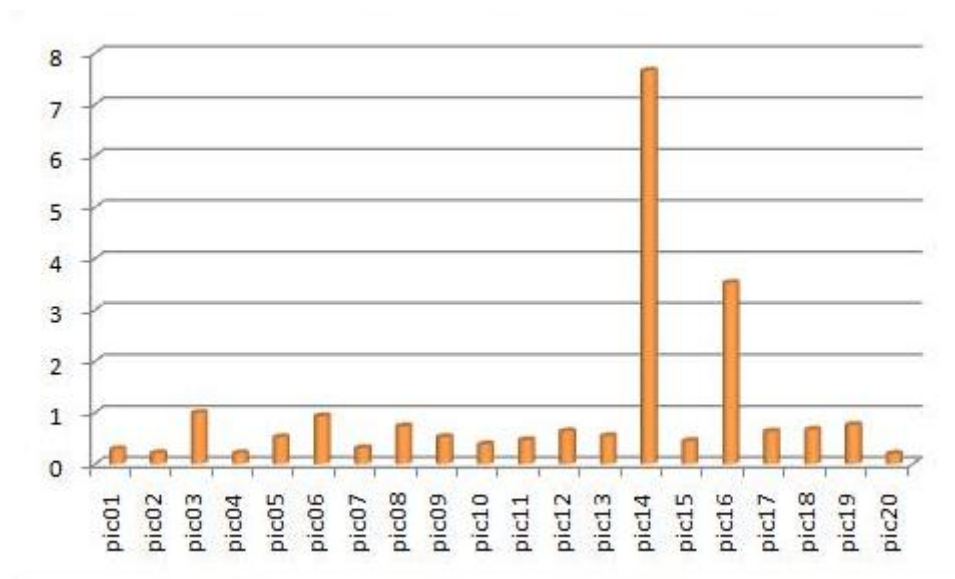
Tabulka 2: Naměřené hodnoty v průběhu experimentu

6.3 Doba běhu algoritmu

Doba běhu algoritmu je dána součtem doby detekce a klasifikace. Jak již bylo uvedeno dříve, detekce značení trvá přibližně 0,2 sekundy s tolerancí několika milisekund. zbývající čas tedy zabírá klasifikace. Doba klasifikace je dána především množstvím potenciálních oblastí značení a velikostí množiny vzorů pro porovnání. Ideální pro dobu běhu je jeden vzor na jednu značku, naopak pro větší úspěšnost je lepší mít vzorů více.

Během experimentu bylo dosaženo průměrného času běhu celého algoritmu 1,036 sekund. Přesné údaje časů jednotlivých běhů udává tabulka 2.

Nejkratší doba běhu byla 0,202 sekund (případ 20), naopak nejdelší doba byla zaznamenána na 7,661 sekund (případ 14).



Obrázek 20: Graf doby běhu algoritmu

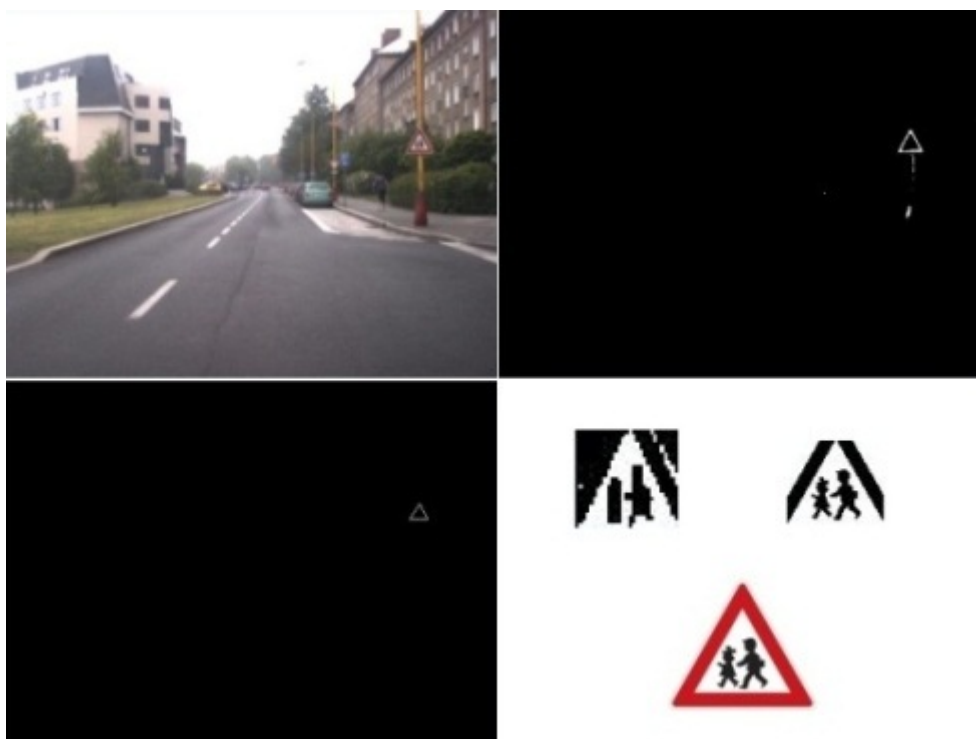
Případ 14 byl oproti průměrné hodnotě víc jak 7x časově náročnější. Tato anomálie byla způsobena nalezením příliš mnoha potenciálních oblastí výskytu značení (důsledek osvětlení scény), které byly jednotlivě porovnávány se všemi vzory. Byl-li by tento případ chápán jako odlehle pozorování, činil by průměr doby běhu algoritmu hodnotu 0,687 sekund.

6.4 Průběh detekce

V následujících podkapitolách jsou posány průběhy detekce některých částí experimentu.

6.4.1 Rychlý průběh detekce

Rychlý průběh detekce byl zaznamenán v případě obrazu *pic07.bmp* (zobrazen na obrázku 21). Fotografie obsahuje pouze malé množství červené barvy. Prahováním byly nalezeny pouze dvě ucelené oblasti jejího výskytu.



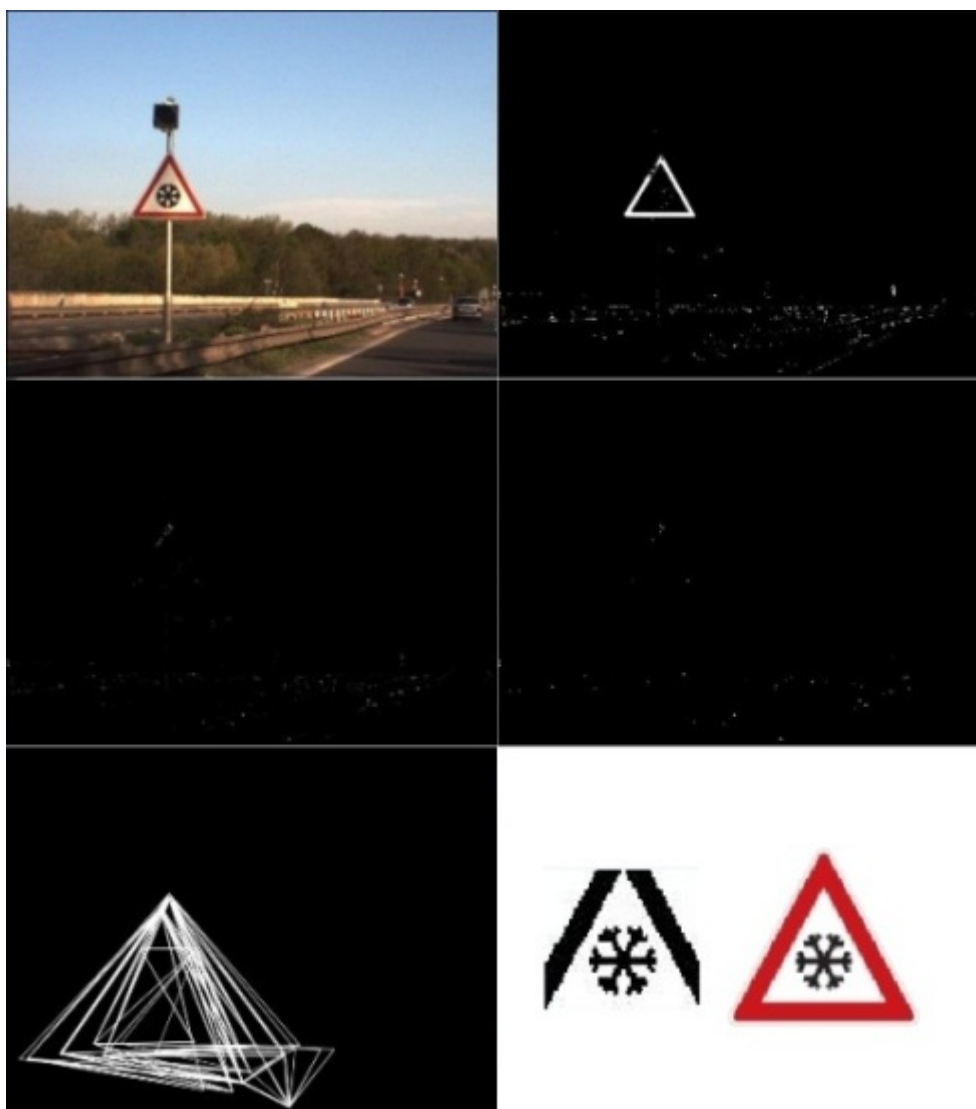
Obrázek 21: Rychlý průběh detekce

Detekce oblastí významných bodů našla velice malé množství pravděpodobných výskytů, z nichž byl sestaven pouze jeden trojúhelník.

Zde má malá kvalita obrazu paradoxně pozitivní dopad na délku běhu. Je to dáno nenalezením rohu vnějšího obrysu červeného lemu značky. Tím pádem nebyl sestaven vnější trojúhelník a klasifikátor měl pro testování piktogramu jen jednu oblast, kterou korektně rozpoznal.

6.4.2 Pomalý průběh detekce

Případ 14 byl zaznamenán jako časově nejnáročnější. Je to dáno vysokým obsahem červeně zbarvených pixelů v obraze (v tomto případě způsobeno osvětlením scény zapadajícím sluncem).



Obrázek 22: Pomalý průběh detekce

Prahováním byla nalezena jedna velká ucelená oblast červené a velké množství malých oblastí (viz obrázek 22). To mělo za následek nalezení velkého počtu oblastí významných bodů (čtvrtá část obrázku).

Z nalezených bodů bylo poté sestaveno velké množství trojúhelníků. Klasifikátor musel porovnat každý z těchto trojúhelníků se všemi vzory, čímž byla způsobena velká prodleva mezi vstupem a výstupem klasifikátoru.

Této situaci lze předejít několika způsoby:

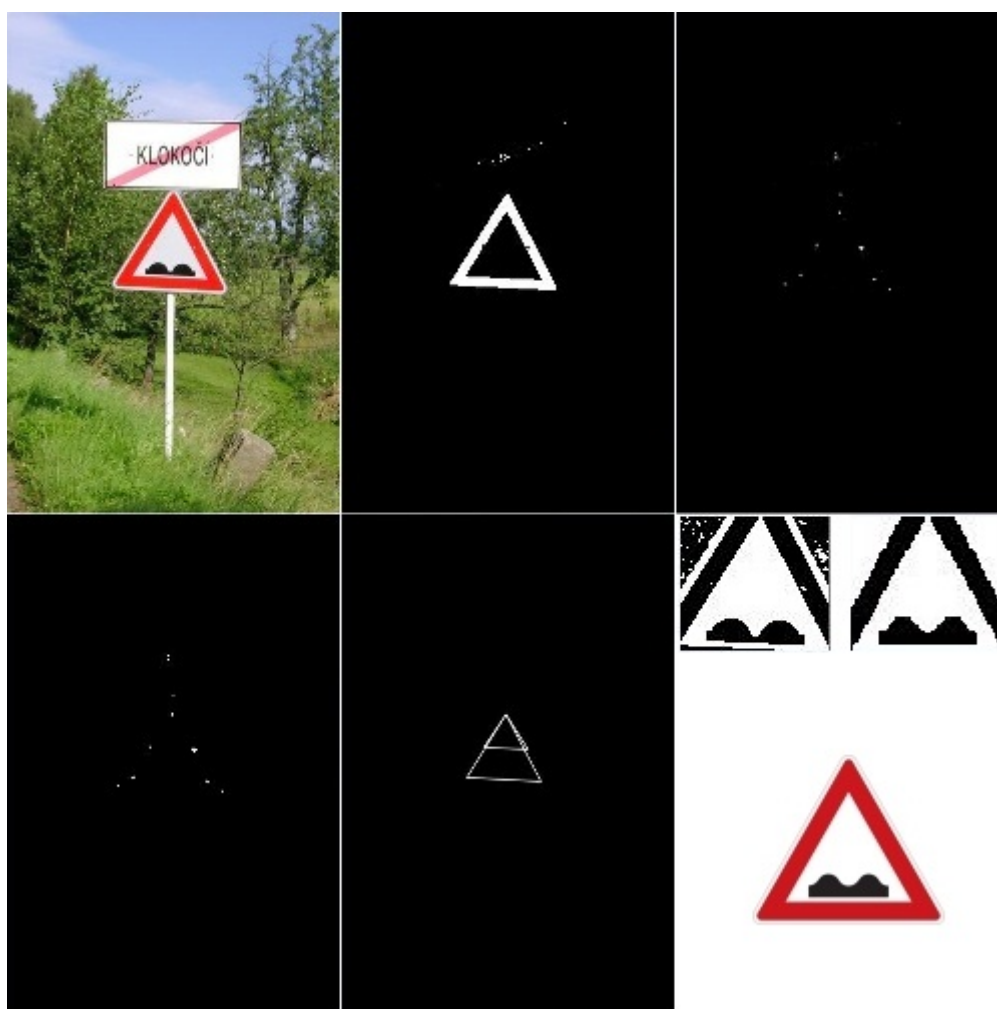
- nastavením prahu pro získání červených oblastí na přísnější hodnoty - nevhodné vzhledem k možné variaci červené v jiných obrazech

- použití Gaussova filtru pro oblast nalezené červené barvy - tímto by došlo k zanedbání šumu červené, rozostření větších oblastí, ale také k vyšší časové náročnosti běhu detektoru
- nastavením přísnější prahovací hodnoty pro rozhodnutí, zda jde o oblast významného bodu či ne (což sebou nese riziko zanedbání chtěného bodu)

Ze všech nalezených oblastí byla pouze jediná s piktoqramem značky, tu klasifikátor korektně rozpoznal a určil shodu se vzorem.

6.4.3 Průběh se správnou klasifikací

Jedná se o průběh detekce v obraze *pic02.bmp* (zobrazen na obr. 23).



Obrázek 23: Průběh správné detekce

V první části obrázku 23 jsou patrné dvě souvislé oblasti červené barvy. Prahováním byla horní část téměř vynechána (přílišná odlišnost odstínu červené). Vyselektováno z ní poté bylo pouze několik bodů (zobrazeno v druhé části obrázku). Detektor rohů poté našel relativně malé množství významných oblastí, ze kterých byly sestaveny dva trojúhelníky. Menší z nich neobsahoval piktoqram značení, přesto však vykazoval relativně velkou podobnost s některými vzory. Nicméně podobnost obrazu daného větším trojúhelníkem byla vyšší a klasifikátor tedy korektně rozpoznal typ dopravní značky.

6.4.4 Průběh s chybnou klasifikací

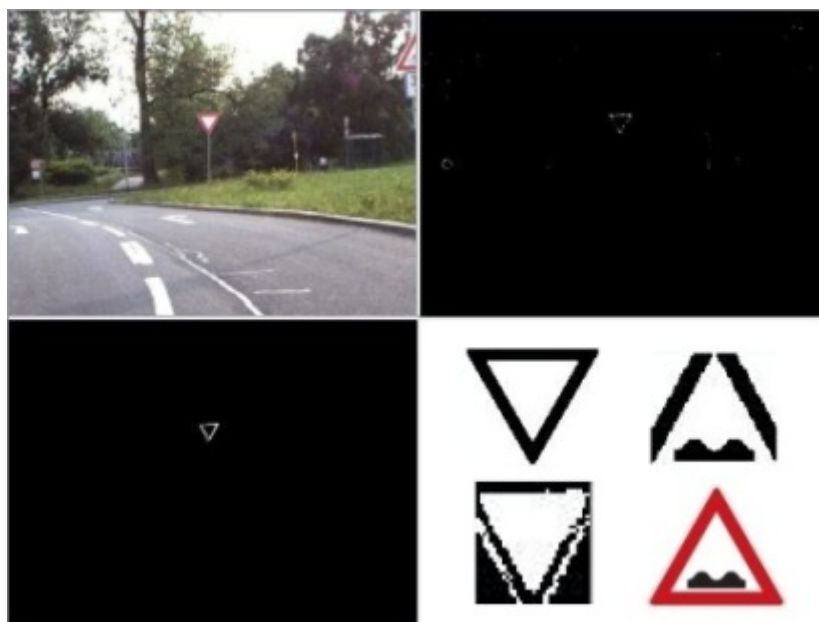
Případ 5 (obrázek 24) narazil na problém při sestavování trojúhelníků, kdy z oblastí červené nalezené na dopravním značení nebyl systém schopen vytvořit rovnostranné trojúhelníky.



Obrázek 24: Průběh chybné detekce 1

Výsledný verdikt rozeznaného značení je dán dostatečnou podobností prahované oblasti v jiném trojúhelníku se vzorem značky. Doba detekce tohoto případu byla navíc příliš dlouhá vzhledem k počtu sestavených trojúhelníků.

V případě č. 9 (obrázek 25) byla korektně provedena detekce, byly nalezeny a sestaveny trojúhelníky definující dopravní značení. Nicméně klasifikátor rozhodl, že obraz je podobnější vzoru značení "Nerovnost na vozovce", nežli vzoru "Pozor dej přednost v jízdě". Chyba byla částečně dána pozadím obrazu značky, a bylo by možno částečně ji předejít jen za cenu rozšíření množiny vzorů. To by však mělo negativní dopad na dobu trvání detekce.



Obrázek 25: Průběh chybné detekce 2

Obdobná situace nastala i v případě 10, kdy bylo ze stejných důvodů značení klasifikováno nesprávně (viz obrázek 26).

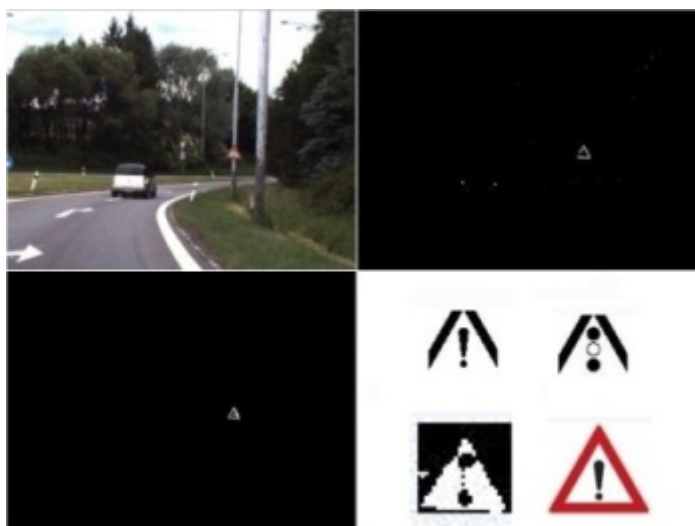
Nalezené oblasti kross korelace posoudila jako podobnější vzoru "Nebezpečné klesání", nežli vzoru "Pozor, dej přednost v jízdě".

Řešení je identické s předešlým případem.



Obrázek 26: Průběh chybné detekce 3

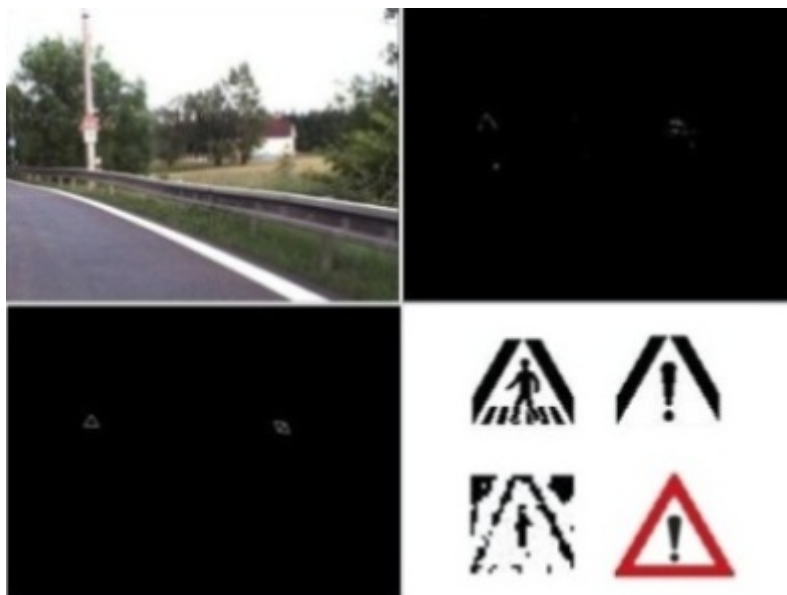
Případ 13 probíhal bez problémů od detekce červených oblastí, přes nalezení významných bodů, až po sestavení trojúhelníků (viz obrázek 27). Problém nastal při porovnávání obrazu se vzory.



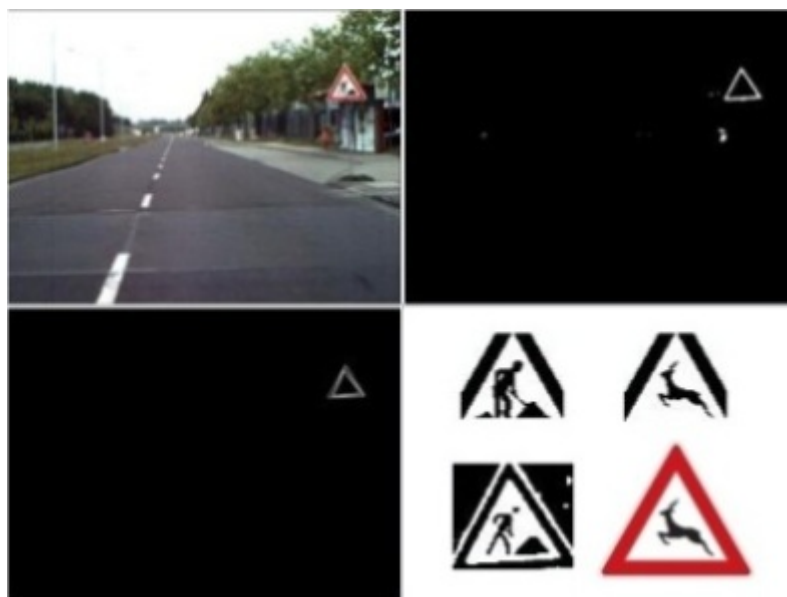
Obrázek 27: Průběh chybné detekce 4

Vzhledem k velikosti zachyceného značení bylo nutné pro správnou funkci kross korelace zvětšit obraz na velikost vzoru. To mělo spolu s prahováním za následek defor-

maci piktogramu a značení bylo podobnější vzoru značky "Jiné nebezpečí", než vzoru "Světelné signály" (viz poslední segment obrázku 27).



Obrázek 28: Průběh chybné detekce 5



Obrázek 29: Průběh chybné detekce 6

Případ 17 (obrázek 28) korektně určená oblast výskytu piktogramu značení, ale při klasifikaci došlo ze stejných příčin jako u předešlého případu k chybnému rozhodnutí. Tato chyba se opakovala také v případě 18 (obrázek 29).

Nejjednodušším řešením chybné klasifikace z důvodu nízké kvality obrazu je její zvýšení. Toho lze dosáhnout použitím fotografií s vyšším rozlišením, což vede k prodloužení doby detekce a klasifikace, popřípadě lze kvalitu fotografií zvýšit při jejich pořizování, tedy použitím zoomu. Toto řešení sebou však rovněž nese negativa. Při přiblížení obrazu se snižuje jeho záběr, takže by sice zachycené značky měly vyšší kvalitu, ale hrozilo by nebezpečí přehlédnutí značení, které se zúžením zorného úhlu kamery může dostat mimo záběr.

7 Závěr

Rozpoznávání dopravního značení v asistenčních dopravních systémech má pro budoucnost značný potenciál. V současné době není jeho využitelnost příliš velká vzhledem k přetrvávajícímu trendu "řidiče za volantem". Díky tomuto omezení má jen varovnou funkci na potenciální nebezpečí, či informativní vzhledem k možnostem dopravní infrastruktury. Plného využití svého potenciálu může dosáhnout pouze v případě plně automatického řízení dopravních prostředků.

Aplikace rozpoznávání značení je ve své množině rozpoznávaného značení zcela funkční. Její klasifikační potenciál je nicméně ovlivněn faktory, jako například kvalita (poškození, znečištění, koroze) dopravního značení, osvětlení, překrytí apd. Z hlediska real time požadavku je časová výkonnost aplikace dobrá.

Pro zvýšení účelnosti veškerých aplikací sloužících k rozpoznávání dopravního značení, by bylo neoptimálnějším řešením změnit podobu veškerého značení na unifikovaný formát.

8 Použité zdroje a seznam příloh

8.1 Literatura

- *Real-Time Detection of Triangular and Rectangular Shape Road Signs*, Boguslaw Cyganek
- *Road Signs Recognition by Scale-Space Template Matching in the Log-Polar Domain*, Boguslaw Cyganek
- *A Real-Time Vision System for Traffic Signs Recognition Invariant to Translation, Rotation and Scale*, Boguslaw Cyganek
- *Real-Time Road Signs Tracking with the Fuzzy Continuously Adaptive Mean Shift Algorithm*, Boguslaw Cyganek
- *Recognition of Road Signs with Mixture of Neural Networks and Arbitration Modules*, Boguslaw Cyganek
- *Umělá inteligence a neuronové sítě*, Ivo Vondrák
- *Real-Time Recognition System For Traffic Signs*, M. Taha Khan
- *Road Sign Detection and Recognition*, Michael Shneier
- *Road Sign Recognition by Single Positioning of Space-Variant Sensor Window*, Dmitry G. Shaposhnikov, Lubov N. Podladchikova, Alexander V. Golovan, Natalia A. Shevtsova
- *Detekce rohů v obraze*, Petr Hýna

8.2 Zdroje

- www.dopravni-znaci.eu
- www.cs.stevens.edu
- www.idiom.com
- www.larmor.com
- acm.osu.cz
- opencv.willowgarage.com

8.3 Přílohy

- Implementace aplikace pro rozpoznávání dopravního značení
- Soubor vzorů vyhledávaného značení
- Soubor testovacích obrazů